

УДК 537.533

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-98-111

Характеристики индуктора и плазмы бесферритных индукционных амальгамных ультрафиолетовых ламп с замкнутыми трубками малого диаметра

О.А. Попов, П.В. Старшинов, Р.А. Иликеева, Д.А. Буреева, И.В. Ирхин, В.А. Левченко

Проведено экспериментальное исследование электрических и излучательных характеристик инновационных эффективных источников ультрафиолетового (УФ) излучения на длине волны 254 нм на основе бесферритных индукционных разрядов низкого давления в замкнутых кварцевых разрядных трубках. Разряд возбуждали с помощью трехвитковой катушки индуктивности на частоте 1,7 МГц, мощности лампы 90...160 Вт в смеси паров ртути давлением ~ 0,01 мм рт. ст. и буферного газа (Ar, смесь 30%Ne + 70%Ar) давлением 0,7 и 1,0 мм рт. ст. в замкнутой трубке диаметром 16,6 мм и длиной 815 мм. Витки катушки, изготовленной из многожильного провода (литцендрата) с низким погонным сопротивлением 0,00014 Ом/см и диаметром 1,5 мм, размещали по периметру разрядной трубки. С ростом мощности лампы мощность потерь в проводе катушки уменьшалась от 7...9 Вт до 3...4 Вт, а КПД катушки возрастал от 92 до 98%. В лампах с давлением буферного газа 1,0 мм рт. ст., максимальные КПД генерации УФ-излучения плазмы (68%) и лампы (66%) достигались на мощностях плазмы 105...155 Вт. Уменьшение давления буферного газа до 0,7 мм рт. ст. снижает КПД генерации УФ-излучения лампы на 10...20% и сдвигает его максимальные значения в область меньших мощностей плазмы.

Ключевые слова: бесферритный индукционный разряд, ртутная плазма низкого давления, ультрафиолетовое излучение, катушка индуктивности.

Для цитирования: Попов О.А., Старшинов П.В., Иликеева Р.А., Буреева Д.А., Ирхин И.В., Левченко В.А. Характеристики индуктора и плазмы бесферритных индукционных амальгамных ультрафиолетовых ламп с замкнутыми трубками малого диаметра // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 98—111. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-98-111.

Inductor and Plasma Characteristics of Ferrite-Free Inductively-coupled Amalgam Ultraviolet Lamps with Closed-loop Small Diameter Discharge Tubes

O.A. Popov, P.V. Starshinov, R.A. Ilikeeva, D.A. Bureeva, I.V. Irkhin, V.A. Levchenko

The electrical and radiation characteristics of innovative high-efficient 254-nm wavelength ultraviolet (UV) radiation sources employing ferrite-free inductively-coupled low-pressure discharges excited in closed-loop quartz tubes are experimentally studied. The discharge was excited using a 3-turn induction coil at a frequency of 1.7 MHz and lamp power equal to 90-160 W in a mixture of mercury vapor at a pressure of around 0.01 mmHg and buffer gas (Ar, a mixture of 30%Ne+70%Ar) at pressures of 0.7 and 1.0 mmHg in a closed tube 16.6 mm in diameter and 815 mm long. The coil turns made of multiconductor wire (Litz wire) with a low per unit length resistivity of 0.00014 Ω m/cm and 1.5 mm in diameter were arranged over the discharge tube perimeter. It was found that, as the lamp power was increased, the power loss in the induction coil wire decreased from 7-9 to 3-4 W, and the coil efficiency increased from 92 to 98%. In lamps filled with buffer gas at a pressure of 1.0 mmHg, the maximal plasma UV radiation generation efficiencies equal to 68% and 66%, respectively, were achieved at plasma power levels of 105-155 W. The decrease of buffer gas pressure to 0.7 mmHg entails a drop of lamp UV radiation generation efficiency by 10-20% and a shift of its maximum values to the zone of lower plasma power values.

Key words: inductively-coupled ferrite-free discharge, low-pressure mercury plasma, ultraviolet radiation, induction coil.

For citation: Popov O.A., Starshinov P.V., Ilikeeva R.A., Bureeva D.A., Irkhin I.V., Levchenko V.A. Inductor and Plasma Characteristics of Ferrite-Free Inductively-coupled Amalgam Ultraviolet Lamps with Closed-Loop Small Diameter Discharge Tubes. Bulletin of MPEI. 2020;5:98—111. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-98-111.

Введение

Безэлектродные индукционные лампы в смесях паров ртути низкого давления $\sim (7...8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и инертных газов — перспективные источники ультрафиолетового (УФ) резонансного излучения (185 и 254 нм), используемого в люминесцентных и бактерицидных лампах [1—5]. Из-за отсутствия внутренних электродов они имеют более высокий, чем электродные лампы, срок службы и могут работать на низких давлениях инертного газа (0,2...1,0 мм рт. ст.), на которых достигается максимум КПД генерации УФ резонансного излучения ртутной плазмы [6—8]. Это дает основания полагать, что безэлектродные индукционные УФ-лампы могут стать конкурентами электродным ртутным/амальгамным УФ-лампам, работающим при более высоких давлениях инертного газа (2...3 мм рт. ст.) [9].

Особый интерес представляют бесферритные индукционные источники УФ-излучения, в которых ртутная плазма возбуждается в замкнутых разрядных трубках с помощью катушки индуктивности, размещенной по периметру трубки [2, 10]. В недавних экспериментальных исследованиях индукционных ламп с кварцевыми трубками с внутренним диаметром $d_{in} = 16,6$ и 25 мм, работающих на частоте $f = 1,7$ МГц и удельных мощностях плазмы $P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl} = 0,5...1,2$ Вт/см (P_{pl} — мощность плазмы; Λ_{pl} — длина замкнутого плазменного витка), были получены высокие значения КПД генерации УФ-излучения плазмы на длине волны 254 нм, $\eta_{254pl} = \Phi_{254}/P_{pl} = 63...65\%$ (Φ_{254} — энергетический поток УФ-излучения) [11]. Они превышают КПД генерации УФ-излучения плазмы (254 нм) не только электродных, но и индукционных бесферритных УФ-ламп, работающих с незамкнутыми линейными трубками на частотах 1...4 МГц, и УФ-ламп трансформаторного типа с частотами 200...300 кГц [6—9].

Из-за значительных потерь мощности в катушке индуктивности ($P_{coil} = 20...40$ Вт), обусловленных высоким погонным сопротивлением одножильного медного провода ($\rho_w = 8 \cdot 10^{-4}$ Ом/см, $d_w = 2,5$ мм), КПД катушки $\eta_{coil} = 1 - P_{coil}/P_{lamp}$ не превышает 80%, а КПД генерации УФ-излучения лампы $\eta_{254} = \Phi_{254}/P_{lamp} = \Phi_{254}/(P_{lamp} + P_{pl}) = \eta_{coil} \eta_{254pl} \sim 50\%$ [11]. Разумно предположить, что используя в бесферритных индукционных лампах катушку индуктивности, изготовленную из провода со значительно меньшим погонным сопротивлением, можно существенно (до 95...97%), повысить КПД катушки, в частности, взяв многожильный провод (литцендрат, число жил $N_{str} = 100...200$), обладающий на частотах $f \sim 1...2$ МГц низким погонным сопротивлением $\rho_w \sim (1...2) \cdot 10^{-4}$ Ом/см.

С практической точки зрения значительный интерес представляет создание высокоэффективных $\eta_{254} > 60\%$, бесферритных индукционных амальгамных источников УФ-излучения (254 нм) с замкнутой разрядной трубкой внутренним диаметром $d_{in} = 16,6$ мм, способных заменить электродные УФ-лампы с разряд-

ными трубками такого же диаметра, работающие на таких же уровнях мощности [9].

Экспериментальная установка и методики измерений

Индукционный разряд зажигали на частоте $f = 1,7$ МГц в замкнутой кварцевой трубке с внутренним диаметром $d_{in} = 16,6$ мм. Лампы имели форму вытянутого эллипса длиной $L = 375$ мм, шириной $H_1 = 120$ мм и расстоянием между длинными трубками $H_2 = 82$ мм (рис 1). Длина плазменного витка, определяемая как длина осевой линии замкнутой трубки, составила $\Lambda_{pl} = 815$ мм. ВЧ-напряжение подавали от генератора ВЧ-мощности на трехвитковую индуктивную катушку длиной $l_w = 3050$ мм, размещенную по периметру лампы (см. рис. 1). Катушка изготовлена из многожильного медного провода (литцендрата) с диаметром провода $d_w = 1,5$ мм, числом $N_{str} = 175$ и диаметром жил $d_{str} = 0,08$ мм, суммарной площадью сечений жил $S_w = 1,35$ мм², погонным сопротивлением $\rho_w = 1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом/см. Активное сопротивление провода катушки индуктивности при температуре $T_w = 50$ °С составило $R_{coil} = 0,041$ Ом, индуктивность катушки $L_{coil} = 4,3$ мкГн. Коэффициент связи катушки с плазменным витком определяли как $k = S_{coil}/S_{pl} = 0,9$, где S_{coil} , S_{pl} — площади сечений, охватываемых катушкой и плазменным витком.

Давление паров ртути в разрядной трубке поддерживали оптимальным рНг $\sim (7...8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. по максимальному выходу УФ резонансного излучения атомов ртути (254 нм) температурой ртутно-индиевой амальгамы ($T_{amlg} = 62...75$ °С), размещенной на внутренней (вакуумной) поверхности стенки разрядной трубки. Использовали два буферных газа с давлением 0,7 и 1,0 мм рт. ст.: Ag и смесь 30%Ne + 7 0%Ag.

Мощность комплекта $P_k = 107...190$ Вт складывалась из мощности потерь в ВЧ-генераторе P_{gen} и мощности, потребляемой лампой P_{lamp} , включающей мощность потерь в проводе катушки индуктивности P_{coil} и мощность, поглощенную плазмой индукционного разряда P_{pl} . На частотах ВЧ-поля $f < 10$ МГц мощность электромагнитного излучения, рассеиваемая катушкой индуктивности, пренебрежительно мала [12]. КПД генератора мощности, работавшего на частоте $f = 1,7$ МГц, находили экспериментально $\eta_{gen} = 1 - (P_{gen}/P_k) \approx 0,9$. ВЧ-напряжение U_c и ток катушки индуктивности I_c

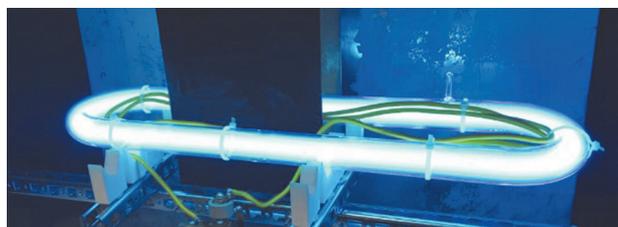


Рис. 1. Бесферритная индукционная ртутная лампа низкого давления с замкнутой разрядной трубкой

измеряли с помощью трансформатора тока, ВЧ высоковольтного щупа и цифрового многоканального осциллографа TektronixTDS640A. Мощность потерь в проводе катушки, P_{coil} определяется методом замещения в отсутствие разряда [2, 13] и рассчитана как

$$P_{coil} = I_c^2 R_{coil}.$$

Мощность потока УФ-излучения замеряли контактным фотодатчиком IS-4, предварительно откалиброванным по показаниям радиометра IL1700 с фотометрической головкой SED240, полученным по методике, использующей модернизированную схему оптических измерений Кайтца [7, 11]. Датчик с креплением надевали на лампу с внутренним диаметром 16,6 мм (по диаметру, аналогичному измеряемым образцам) и одновременно измеряли мощности УФ-излучения обоими сенсорами. Перед измерением проводили калибровку, а после — повторную сверку. Подобная методика применяется для контроля работы облучательных установок по обеззараживанию воды, благодаря своей простоте и легкости реализации при отсутствии требований к высокой точности измерений [11]. Проверку равномерности энергетической светимости лампы по ее поверхности осуществляли с помощью фотодатчика IS-4, расположенного вплотную к поверхности колбы в точках 1 — 6 (рис. 2).

Результаты измерений приведены в таблице. Видно, что продольная неравномерность светимости по поверхности разрядной трубки (точки 1 — 3) не превышает $\pm 4,6\%$ относительно максимальной светимости, а азимутальная неравномерность светимости, измеренной в точках 4 — 6, не более 2,8%. Различия в измеренных значениях светимости лежат в пределах погрешности измерений, что позволяет сделать допущение о продольной и азимутальной однородностях потока УФ-излучения (254 нм) и использовать методи-

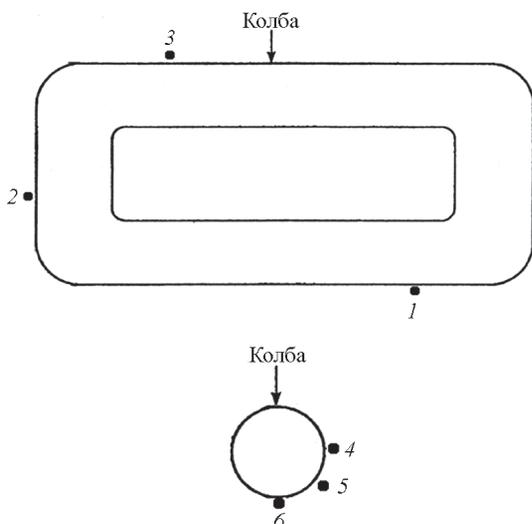


Рис. 2. Расположение фотодатчика на поверхности разрядной трубки

Результаты измерений равномерности энергетической светимости лампы по ее поверхности

Точка	Измеряемая величина	
	приведенная светимость, о.е.	среднеквадратичное отклонение
1	99,5	1,2
2	97,5	1,5
3	90,8	3,3
4	94,3	0,8
5	98,7	1,0
6	100	0,6

ку Кайтца для измерения энергетического потока УФ-излучения исследуемых ламп на длине волны 254 нм.

Электрические характеристики высокочастотного индуктора

На рисунке 3 приведены измеренные ВЧ-напряжения на катушке индуктивности U_c , как функции мощности лампы P_{lamp} . Увеличение потребляемой лампой ВЧ-мощности (фактически плазмы, поскольку $P_{pl} \gg P_{coil}$) ведет к уменьшению ВЧ-напряжения на катушке во всем интервале мощностей. В лампе с аргоном давлением 1,0 мм рт. ст. ВЧ-напряжение на катушке монотонно снижается от 600 ($P_{lamp} = 100$ Вт) до 400 В ($P_{lamp} = 150$ Вт). Падения давления и атомного веса инертного газа (добавка «легкого» неона к «тяжелому» аргону) вызывают повышение (на 10...20%) ВЧ-напряжения на катушке индуктивности.

Итоги измерения ВЧ-тока катушки I_c , изображенные на рис. 4, показывают, что характер зависимости I_c от P_{lamp} близок к зависимости U_c от P_{lamp} и обладает падающим характером. В лампе с аргоном (1 мм рт. ст.) ВЧ-ток в катушке снижается от 13 ($P_{lamp} = 100$ Вт) до 8 А ($P_{lamp} = 160$ Вт). Уменьшение давления аргона, как и «добавка» к аргону более легкого газа (неона) приводят к росту тока катушки. Причина близкого характера зависимостей U_c и I_c от P_{lamp} обусловлена слабым влиянием нагрузки (плазмы) на первичную цепь и, соответственно, фактической независимостью импеданса первичной цепи $Z_1 = U_c / I_c$ от мощности плазмы. В результате почти двукратное увеличение поглощенной плазмой мощности P_{pl} сопровождается незначительным снижением Z_1 от 41...45 ($P_{pl} = 88$ Вт) до 38...42 Ом ($P_{pl} = 168$ Вт).

В рамках трансформаторной модели индукционного разряда, возбужденного на частотах $\omega \ll \nu_e$ (ν_e — частота упругих соударений электронов с атомами рабочей смеси), в соответствии с эквивалентной схемой разряда выражение для импеданса первичной цепи с плазменной нагрузкой имеет вид [2, 13]:

$$Z_1 = U_c / I_c = \left\{ [R_{coil} + R_{pl}^r]^2 + \omega^2 [L_{coil} - L_{ind}^r]^2 \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

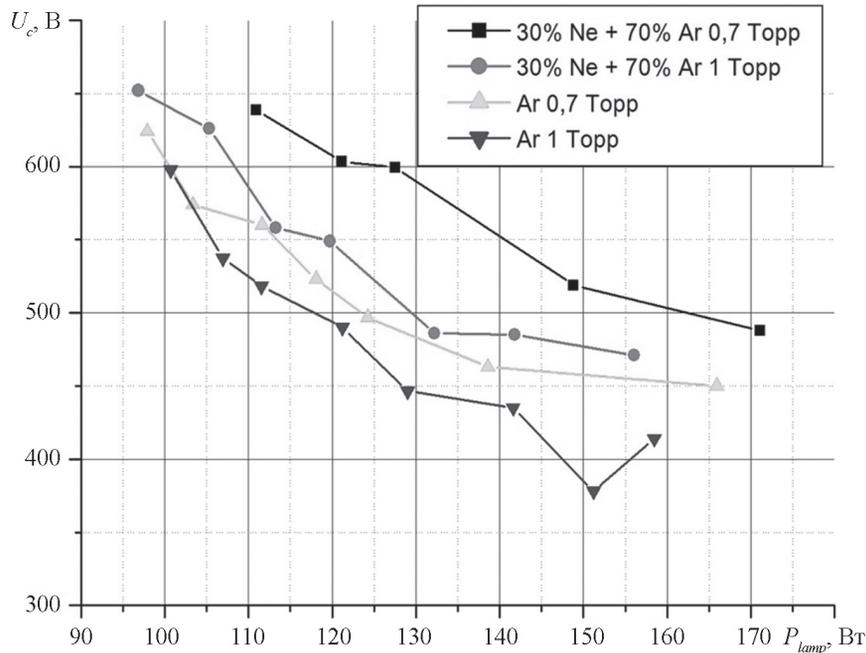


Рис. 3. Зависимости ВЧ-напряжения на катушке U_c от мощности лампы P_{lamp}

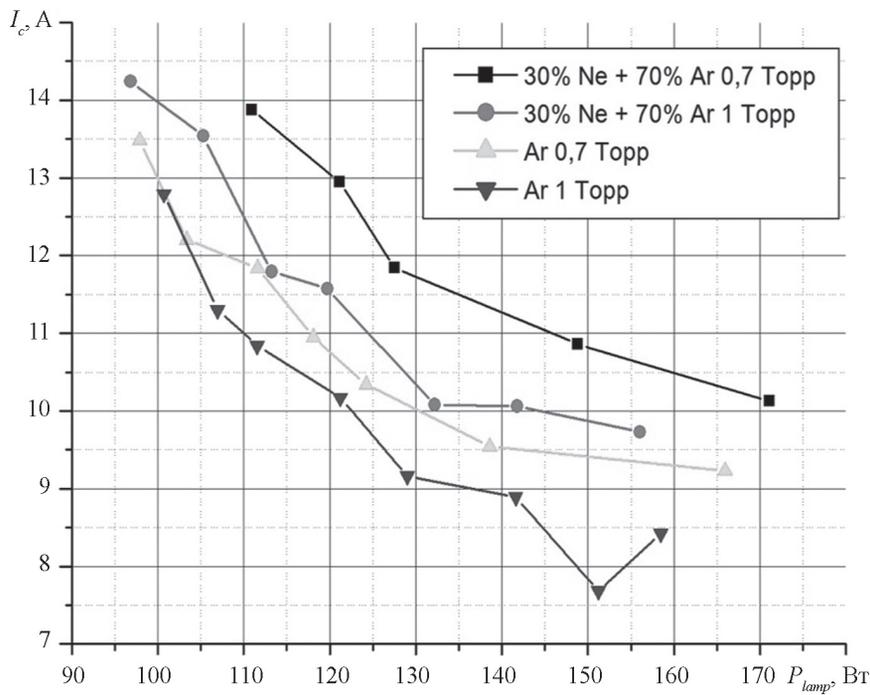


Рис. 4. Зависимости ВЧ-тока в катушке I_c от мощности лампы P_{lamp}

где R_{coil} — активное сопротивление катушки индуктивности, $R_{coil} = 0,041$ Ом; L_{coil} — индуктивность катушки, $L_{coil} = 4,3$ мкГн; R_{pl} — активное сопротивление плазменного витка; R_{pl}^{ir} — «внесенное» в первичную цепь активное сопротивление плазменного витка [2, 13]:

$$R_{pl}^{ir} = K^2 R_{pl} = (\omega M / Z_2)^2 R_{pl}; \quad (2)$$

L_{ind}^{ir} — «внесенная» в первичную цепь геометрическая индуктивность плазменного витка [2, 13]:

$$L_{ind}^{ir} = K^2 L_{ind} = (\omega M / Z_2)^2 L_{ind}, \quad (3)$$

где K — безразмерный коэффициент трансформации, $K = (\omega M / Z_2)$;

L_{ind} — геометрическая индуктивность плазменного витка [10, 11, 14]:

$$L_{ind} = 2\pi D_{pl} \{ \ln(4D_{pl} / 0,39\pi d_{pl}) - 1,75 \} 10^{-9}, \quad (4)$$

где $d_{pl} \approx 0,75d_{inn}$ — диаметр сечения плазменного витка; D_{pl} — эквивалентный диаметр плазменного витка [10, 11]:

$$D_{pl} = [4(LH_2)/\pi]^{1/2},$$

где L — длина лампы; H_2 — расстояние между «длинными» трубками лампы.

На частотах ВЧ-поля $\omega = 2\pi f \ll v_e$ выражение (1) для импеданса плазменного витка Z_2 упрощается [2, 13]:

$$Z_2 = U_2/I_{pl} = \{R_{pl}^2 + (\omega L_{ind})^2\}^{1/2},$$

где ωL_{ind} — реактивное сопротивление геометрической индуктивности плазменного витка.

При разумных допущениях независимостей d_{pl} и D_{pl} от мощности плазмы геометрическая индуктивность плазменного витка, рассчитываемая по (4), не зависит от мощности плазмы и составляет $L_{ind} = 0,5$ мкГн. Соответственно, индуктивное сопротивление плазменного витка на частоте ВЧ-поля $f = 1,7$ МГц, $\omega L_{ind} = 6$ Ом. Активное сопротивление плазменного витка R_{pl} уменьшается с ростом мощности плазмы от 420 ($P_{pl} = 90$ Вт) до 110 Ом ($P_{pl} = 160$ Вт), на всех уровнях мощности $R_{pl} \gg \omega L_{ind}$, а импеданс плазменного витка Z_2 можно считать чисто активным $Z_2 \approx R_{pl}$.

Взаимная индуктивность катушки индуктивности и плазменного витка M определяется как [2, 11]:

$$M = k(L_{coil}L_{ind})^{1/2} \quad (5),$$

и при $k = 0,9$; $L_{coil} = 4,3$ мкГн; $L_{ind} = 0,5$ мкГн имеет значение $M = 1,3$ мкГн. Соответственно, индуктивное сопротивление взаимной индуктивности $\omega M = 14$ Ом.

Вычисленная по (3) для всех мощностей плазмы «внесенная» в первичную цепь индуктивность плазменного витка $L_{ind}^r = 0,0011...0,016$ мкГн пренебрежимо мала по сравнению с индуктивностью катушки $L_{coil} = 4,3$ мкГн. Рассчитанное по (2) «внесенное» в первичную цепь активное сопротивление плазменного витка $R_{pl}^r = 0,47...1,5$ Ом существенно превышает

ет активное сопротивление катушки индуктивности $R_{coil} = 0,041$ Ом, но даже при максимальной мощности плазмы ($P_{pl} = 170$ Вт) остается значительно меньше индуктивного сопротивления катушки индуктивности $\omega L_{coil} = 46$ Ом.

Таким образом, в исследованном диапазоне мощностей плазмы $P_{pl} = 88...170$ Вт и на частоте ВЧ-поля $f = 1,7$ МГц импеданс первичной цепи Z_1 фактически определяется величиной реактивного сопротивления катушки индуктивности

$$Z_1 = U_c/I_c \approx \left\{ [R_{pl}^r]^2 + [\omega L_{coil}]^2 \right\}^{1/2} \approx \omega L_{coil}$$

и не зависит от вторичной цепи (плазменного витка).

Измеренные методом замещения [2, 13] мощности потерь в проводе катушки P_{coil} приведены на рис. 5 как функции мощности лампы P_{lamp} . Видно, что P_{coil} уменьшается от 7...9 ($P_{lamp} = 95$ Вт) до 3...4 Вт ($P_{lamp} = 170$ Вт), а снижение давления и атомного веса буферного газа (разбавление аргона неона) незначительно (на 1...2 Вт) повышает величину P_{coil} . Отметим, что потери мощности в проводе катушки, изготовленной из литцендрата с погонным сопротивлением $\rho_w = 1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом/см, в несколько раз меньше, чем потери в катушке, изготовленной из одножильного медного провода того же диаметра, использованной в бесферритной индукционной лампе с замкнутой трубкой с такими же конструктивными параметрами [11].

Малые потери мощности в проводе катушки индуктивности, изготовленной из литцендрата с низким погонным сопротивлением, обусловили ее высокий КПД $\eta_{coil} = 1 - (P_{coil}/P_{lamp})$. На рисунке 6 дана зависимость η_{coil} от мощности плазмы индукционной лампы P_{pl} с замкнутой разрядной трубкой диаметром 16,6 мм,

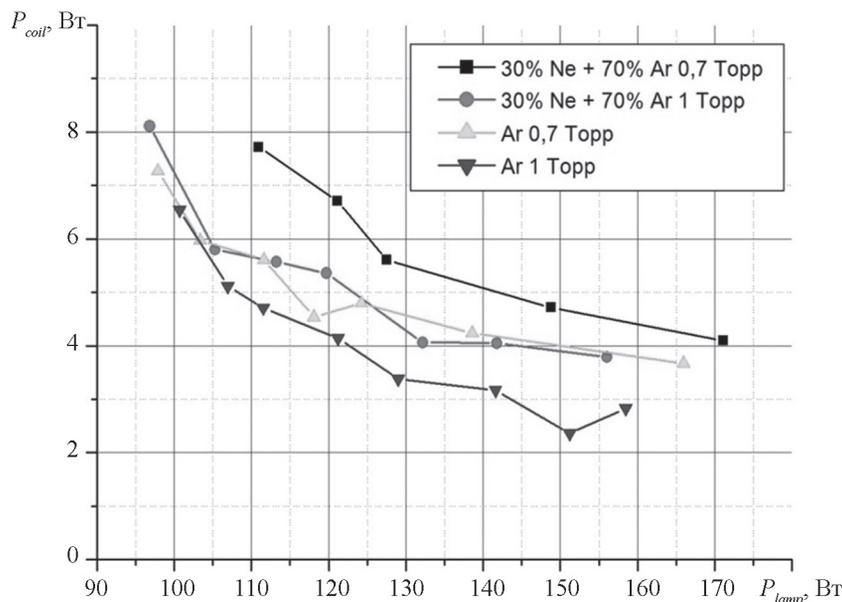


Рис. 5. Зависимости мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P_{lamp}

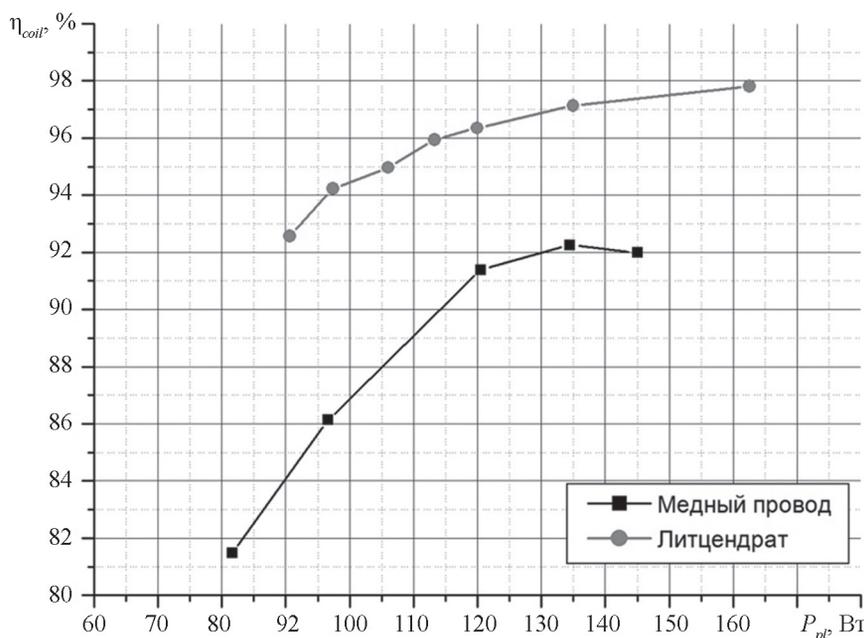


Рис. 6. Зависимости КПД двух катушек индуктивности η_{coil} от мощности лампы P_{lamp} (Ar, 0,7 мм рт. ст.)

наполненной смесью паров ртути ($\sim 7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) и аргона (0,7 мм рт. ст.). Видно, что η_{coil} возрастает с увеличением мощности плазмы от 92,5 ($P_{pl} = 91$ Вт) до 98% ($P_{pl} = 163$ Вт), проявляя тенденцию к насыщению. Также на рис. 6 в роли функции P_{pl} показана зависимость КПД трехвитковой катушки индуктивности, изготовленной из одножильного медного провода сечением $S_w = 4,0$ мм², использованной в этой же лампе, работавшей на частоте 1,7 МГц и $P_{pl} = 80 \dots 145$ Вт. Видно, что КПД катушки, изготовленной из одножильного провода, заметно ниже, чем КПД катушки, изготовленной из литцендрата: на 10...12% при $P_{pl} = 80 \dots 90$ Вт и на 5...6% — при $P_{pl} = 140 \dots 150$ Вт. Соответственно, в этой лампе ниже КПД генерации УФ-излучения лампы $\eta_{254} = \eta_{coil} \eta_{254pl}$. Из-за значительно большей (в 3 раза!) площади сечения одножильного провода растет блокирование потока УФ-излучения лампы витками катушки индуктивности.

На рисунке 7 изображены КПД катушки индуктивности, изготовленной из литцендрата, полученные в индукционных лампах с буферным наполнением различного состава и давления. Увеличение давления аргона от 0,7 до 1 мм рт. ст. незначительно, лишь на 1...2% (фактически в пределах погрешности измерений) повышает КПД катушки. В то время, как «разбавление» аргона более легким неоном заметно снижает КПД катушки, особенно на относительно малых мощностях плазмы (на 7...12%).

Параметры плазмы индукционного разряда

При частотах ВЧ-поля $f < 10$ МГц и не очень низких давлениях рабочей смеси, когда выполняется неравенство $\omega \ll \nu_e$, напряженность ВЧ электрического поля

в плазме индукционного разряда имеет лишь активную составляющую $E_{pl} = E_a$ и потому находится в фазе с разрядным током I_{pl} [2].

В этих условиях ВЧ-ток катушки I_c , определяющий величину мощности потерь в проводе катушки индуктивности ($P_{coil} = I_c^2 R_{coil}$), связан с параметрами плазмы индукционного разряда соотношением [2, 13]:

$$I_c = \Lambda_{pl} \bar{E}_{pl} / \omega M,$$

где \bar{E}_{pl} — усредненная по сечению плазмы напряженность ВЧ-поля; Λ_{pl} — длина плазменного витка; M — взаимная индуктивность плазменного витка и катушки индуктивности (5).

Зная экспериментально полученные значения ω , Λ_{pl} и I_c и рассчитав по (5) величину M , можно для каждого значения I_c (и, соответственно, P_{pl}) найти \bar{E}_{pl} :

$$\bar{E}_{pl} = \omega M I_c / \Lambda_{pl}. \quad (6)$$

На рисунке 8 приведены зависимости усредненной по сечению плазмы напряженности ВЧ-поля \bar{E}_{pl} от мощности плазмы P_{pl} , вычисленные по (6) для смесей (Ar и 30%Ne + 70%Ar) и их давлений 0,7 и 1,0 мм рт. ст. Видно, что в лампе с аргоном давлением 1,0 мм рт. ст. \bar{E}_{pl} уменьшается от 2,3 ($P_{pl} = 94$ Вт) до 1,5 В/см ($P_{pl} = 155$ Вт) с тенденцией к «размытому» минимуму на относительно больших мощностях плазмы. Чем ниже давление буферной смеси и чем легче ее вес (аргон, разбавленный неоном), тем на большей мощности достигается минимум. В лампе с аргоном (1 мм рт. ст.) на $P_{pl} = 150 \dots 160$ Вт, в лампе со смесью 30%Ne + 70%Ar (0,7 мм рт. ст.) — на $P_{pl} > 170$ Вт.

Снижение давления буферной смеси от 1,0 до 0,7 мм рт. ст. незначительно повышает напряжен-

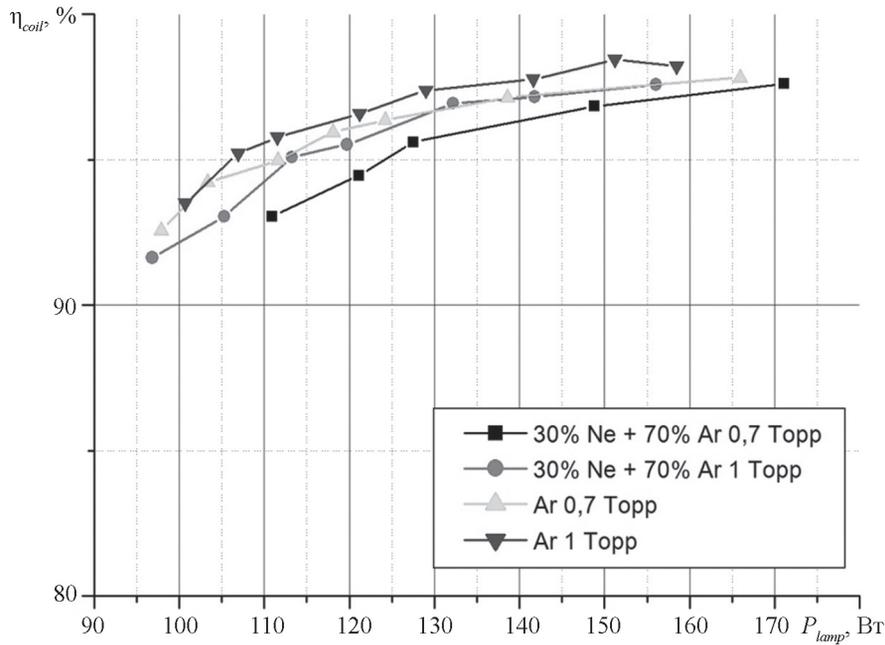


Рис. 7. Зависимости КПД катушки индуктивности η_{coil} от мощности лампы P_{lamp}

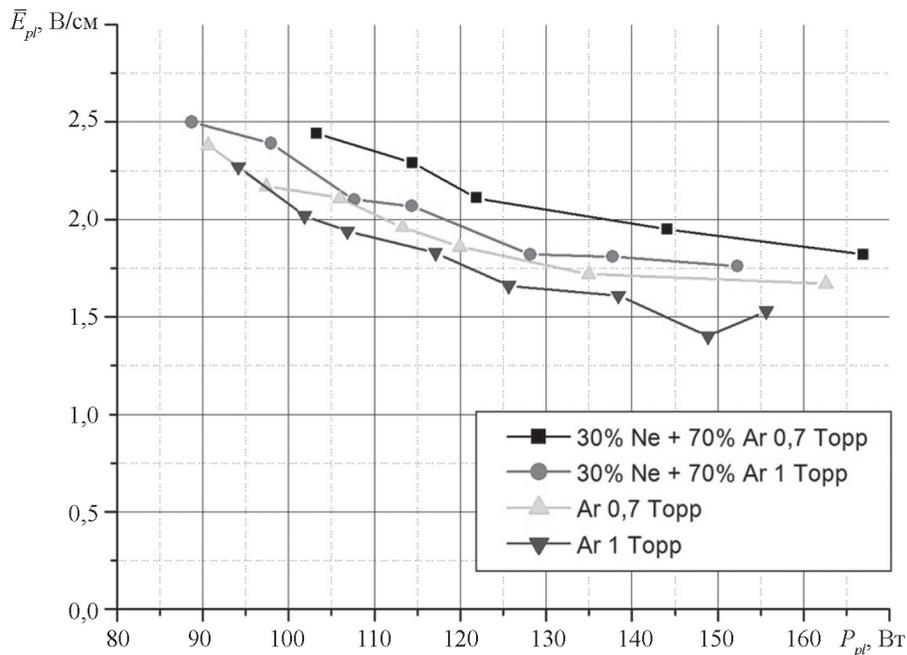


Рис. 8. Зависимость усредненного по сечению плазмы напряженности ВЧ электрического поля \bar{E}_{pl} от мощности плазмы P_{pl}

ность электрического поля в плазме (на 5...10%). Добавление к аргону более легкого газа (неона) приводит к несколько большему росту \bar{E}_{pl} (на 10...15%), что наблюдается также в плазме ртутного разряда низкого давления с внутренними электродами [15]. При неизменной удельной мощности плазмы $P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl}$ повышение напряженности ВЧ электрического поля в плазме сопровождается уменьшением разрядного тока I_{pl} а с ним и плотности плазмы n_e . При фиксированной частоте ВЧ-поля ($f = 1,7$ МГц) понижение n_e увеличивает толщину скин-слоя $\delta \sim (n_e f)^{-1/2}$ и, соответственно,

сдвигает скин-эффект в область больших разрядных токов и мощностей плазмы [11, 16].

Об отсутствии скин-эффекта в плазме разрядов исследованных ламп свидетельствуют и монотонные уменьшения с ростом мощности лампы P_{lamp} (фактически P_{pl}) мощности потерь в катушке индуктивности, P_{coil} и ВЧ-напряжения на катушке U_c в лампах с обеими буферными смесями давлением (0,7 и 1,0 мм рт. ст.) (см. рис. 3, 5).

Полученные усредненные по сечению плазмы напряженности ВЧ электрического поля \bar{E}_{pl} весьма близ-

ки к значениям \bar{E}_{pl} , рассчитанным для бесферритных индуктивных ламп с такими же конструктивными параметрами разрядной трубки, но с катушкой индуктивности, изготовленной из одиночного медного провода [11]. В то же время, они значительно выше (в 2 раза) значений \bar{E}_{pl} в плазме ламп с разрядной трубкой большего диаметра $d_{inn} = 25$ мм, работающих на той же частоте (1,7 МГц) и на таких же мощностях плазмы [11].

На отсутствие скин-эффекта указывает монотонный близкий к линейному рост разрядного тока I_{pl} с увеличением мощности плазмы P_{pl} (рис. 9), рассчитанного в рамках трансформаторной модели индукционного разряда по формуле [2]

$$I_{pl} = P_{pl} / \omega M I_c.$$

Из рисунка 9 следует, что чем выше давление и вес буферной смеси, тем выше разрядный ток, и тем ниже ВЧ-напряжение на плазменном витке U_{pl} и меньше его сопротивление R_{pl} . В лампе с аргоном (1 мм рт. ст.) I_{pl} увеличивается от 0,47 ($P_{pl} = 90$ Вт) до 1,25 А ($P_{pl} = 155$ Вт), что весьма близко к значениям разрядного тока в индукционной лампе с трубкой с такими же конструктивными параметрами, но с трехвитковой катушкой индуктивности, изготовленной из одножильного медного провода [11].

Вольтамперные характеристики (ВАХ) индукционных ламп U_{pl} от I_{pl} предложены на рис. 10, из которого видно, что все изучаемые лампы имеют отрицательную ВАХ, что характерно для низкотемпературной плазмы низкого давления, поддерживаемой на частотах и удельных мощностях плазмы, на которых отсутствует (или слабо выражен) скин-эффект [12].

По значениям разрядного тока и мощности плазмы рассчитаны $Z_2 \approx Z_{pl} \approx R_{pl} = P_{pl} / I_{pl}^2$ значения сопротивления плазменного витка и приведены в зависимости от мощности плазмы на рис. 11. В данном случае R_{pl} уменьшается с ростом P_{pl} и растет с уменьшением давления и веса буферного газа (смеси газов). Если в лампе с аргоном (1,0 мм рт. ст.) R_{pl} уменьшается от 245 ($P_{pl} = 105$ Вт) до 100 Ом ($P_{pl} = 155$ Вт), то в лампе с более легкой смесью (30%Ne + 70%Ar) меньшего давления (0,7 мм рт. ст.) сопротивление плазменного витка значительно выше (на 45...55%) и понижается с ростом мощности плазмы от 370 ($P_{pl} = 105$ Вт) до 155 Ом ($P_{pl} = 155$ Вт).

Излучательные характеристики плазмы

Зависимости потока УФ-излучения Φ_{254} от мощности лампы P_{lamp} , измеренные в смеси паров ртути $p_{Hg} \sim (7...8) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. с аргоном и со смесью 30%Ne + 70%Ar давлением 0,7 и 1,0 мм рт. ст., приведены на рис. 12, где Φ_{254} возрастает с мощностью лампы монотонно и в лампах с давлением буферного газа (Ar и смеси Ne/Ar) 1,0 мм рт. ст. увеличивается от 55 ($P_{lamp} = 95$ Вт) до 103 Вт ($P_{lamp} = 160$ Вт). Уменьшение давления аргона и смеси Ne/Ar до 0,7 мм рт. ст. снижает во всем диапазоне мощностей лампы (фактически плазмы P_{pl}) поток УФ-излучения на 13...20%.

КПД генерации УФ-излучения лампы, рассчитанные как $\eta_{254} = \Phi_{254} / P_{lamp}$, даны на рис. 13. Видно, что η_{254} на относительно малых мощностях растет с увеличением P_{lamp} , достигая максимума, который в лампах с большим давлением буферного газа (1,0 мм рт. ст.) расположен на меньших мощностях лампы (фактиче-

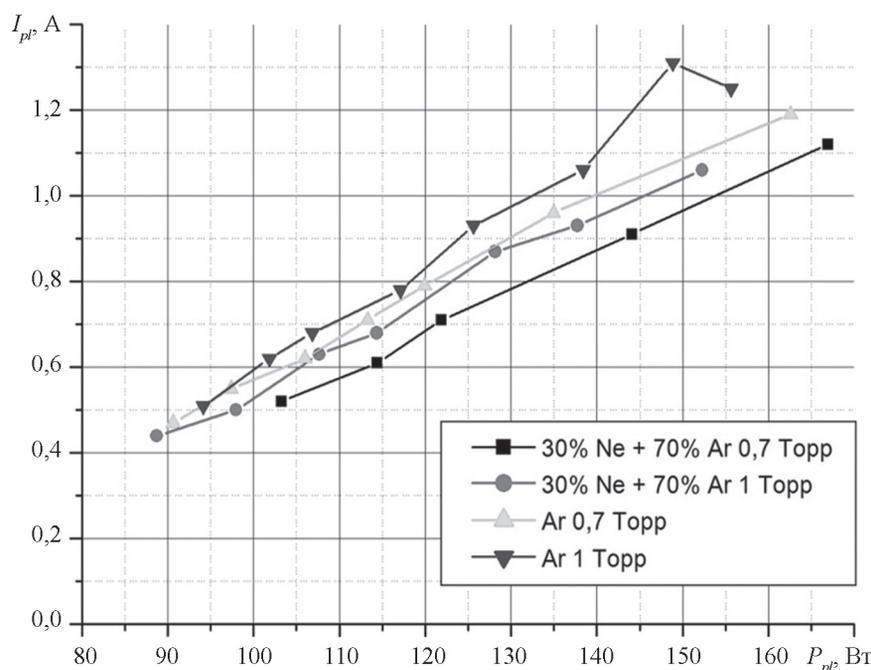


Рис. 9. Зависимость разрядного тока I_{pl} от мощности плазмы P_{pl}

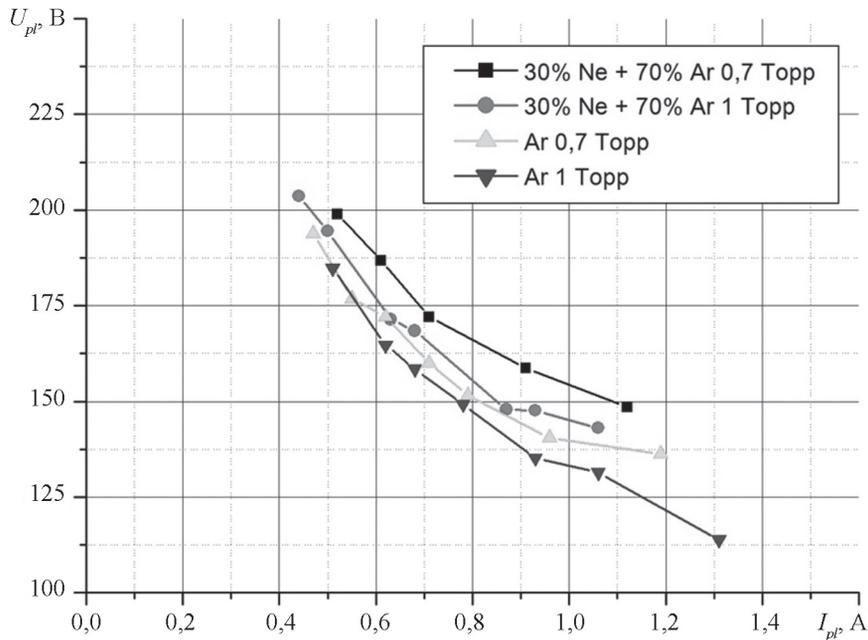


Рис. 10. Вольтамперная характеристика бесферритного индукционного разряда с замкнутой трубкой

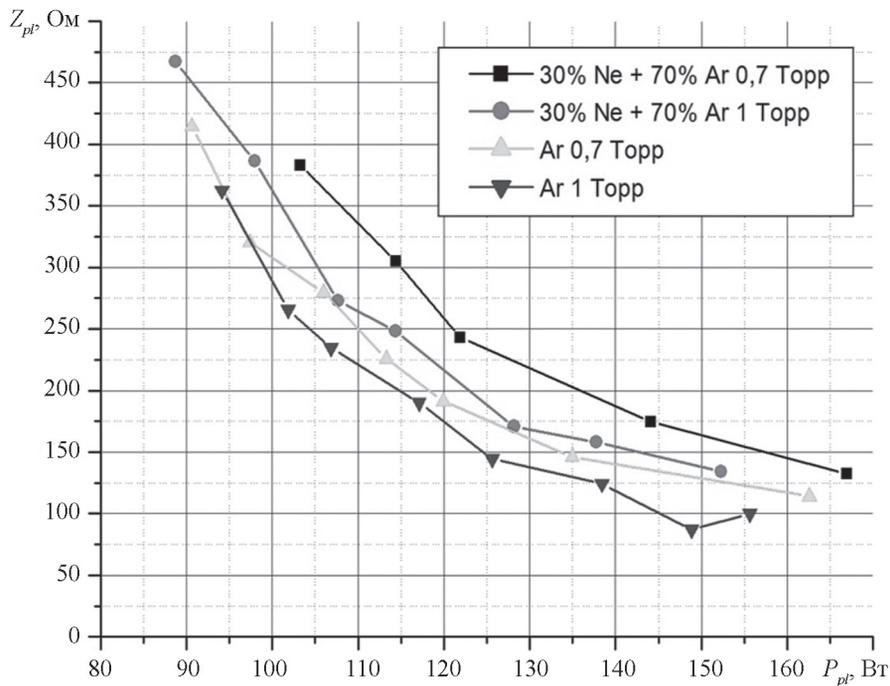
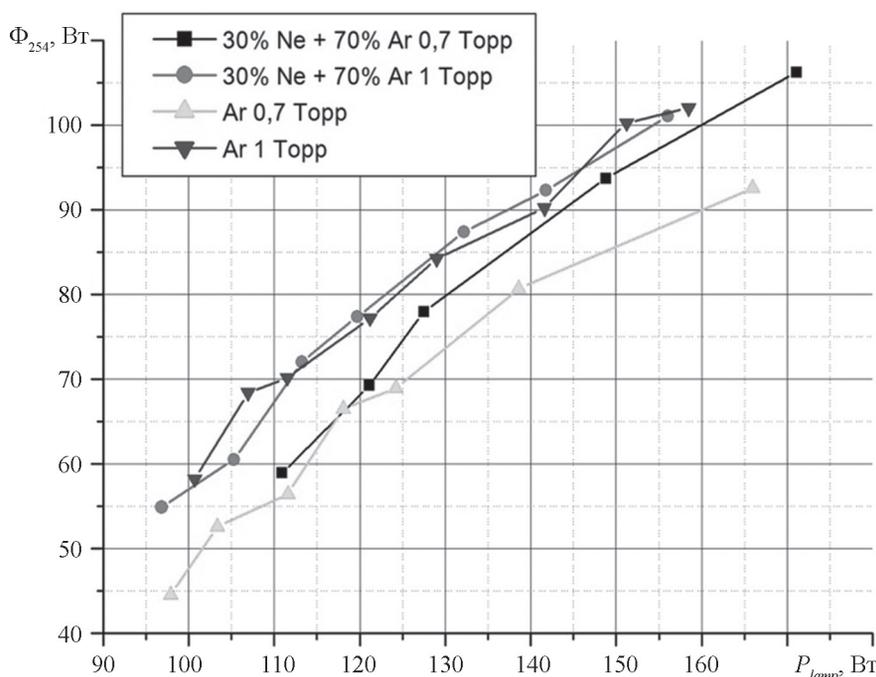
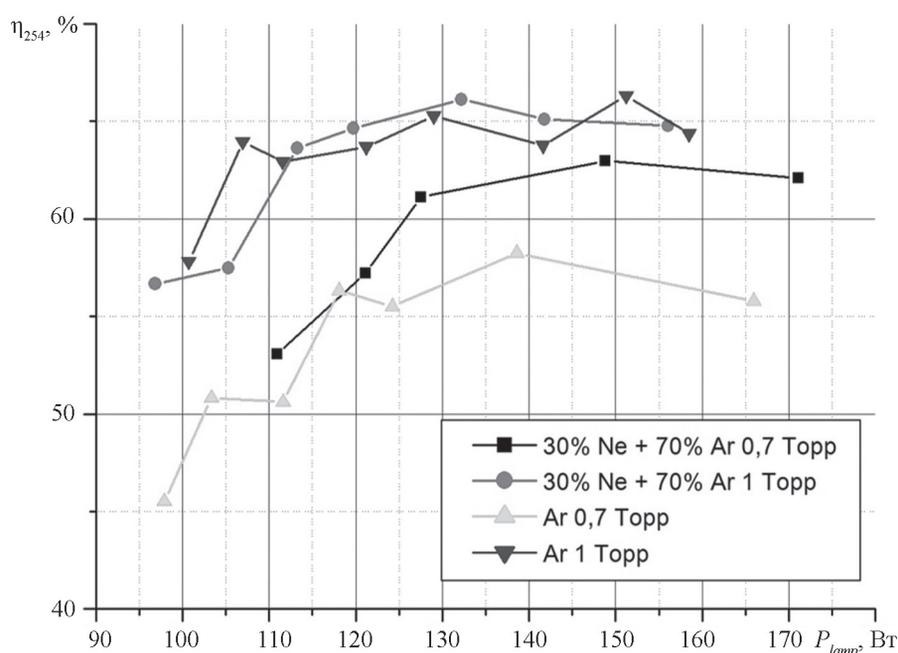


Рис. 11. Зависимость активного сопротивления плазменного витка R_{pl} от мощности плазмы P_{pl}

ски плазмы, поскольку $P_{coil} \ll P_{pl}$, $P_{lamp} \approx P_{pl}$). Лампы с буферным газом (смеси газов) давлением 1,0 мм рт. ст. показывают более высокий, чем лампы с более низким давлением (0,7 мм рт. ст.), КПД генерации УФ-излучения лампы, достигающего при $P_{lamp} = 120...160$ Вт (удельные мощности плазмы $P_1 = 1,25...1,85$ Вт/см), весьма высоких значений $\eta_{254} = 65...67\%$. Отметим, что они значительно выше КПД бесферритных индукционных УФ-ламп с замкнутой трубкой с такими же конструктивными параметрами, но с катушкой

индуктивности, изготовленной из одножильного медного провода с большим погонным сопротивлением $\rho_w = 8 \cdot 10^{-4}$ Ом/см [11]. Они также выше КПД электродных УФ-ламп и ламп трансформаторного типа с разрядными трубками такого же диаметра, работавших на удельных мощностях плазмы $P_1 = 2,1...2,2$ Вт/см [7, 9].

Зависимости КПД генерации УФ-излучения плазмы $\eta_{254pl} = \Phi_{254}/P_{pl}$ от мощности плазмы P_{pl} изображены на рис. 14. В силу малости мощности потерь в проводе катушки ($P_{coil} \ll P_{pl}$) зависимости η_{254pl} от P_{pl} весьма

Рис. 12. Зависимость потока УФ-излучения лампы Φ_{254} от мощности лампы P_{lamp} Рис. 13. Зависимость КПД генерации УФ-излучения лампы η_{254} от мощности лампы P_{lamp}

близки к соответствующим зависимостям η_{254} от P_{lamp} , а значения η_{254pl} всего на 2...5% превышают η_{254} , достигая в максимуме 67...68% ($P_{pl} = 100...150$ Вт), а затем уменьшаются с ростом мощности плазмы. Практически такие же максимальные показатели КПД генерации УФ-излучения плазмы $\eta_{254pl} = 66...67\%$ получены в индукционных бесферритных лампах с замкнутыми разрядными трубками большего диаметра $d_{inn} = 25$ мм, работавшими при давлении аргона 1,0 мм рт. ст. на удельных мощностях плазмы $P_1 = 0,9...1,1$ Вт/см с

меньшими напряженностями электрического поля $\bar{E}_{pl} = 0,9...1,0$ В/см и большими разрядными токами $I_{pl} = 1,0...1,2$ А [11].

Корреляция между η_{254pl} и P_{coil} наблюдаемая в лампе с аргоном (1 мм рт. ст.) при $P_{pl} = 150...60$ Вт (незначительные, в пределах погрешности измерений, увеличение P_{coil} и уменьшение η_{254pl}), не присутствовала в других исследованных индукционных лампах, что также указывает на отсутствие (или несущественность) скин-эффекта в условиях эксперимента (малый диа-

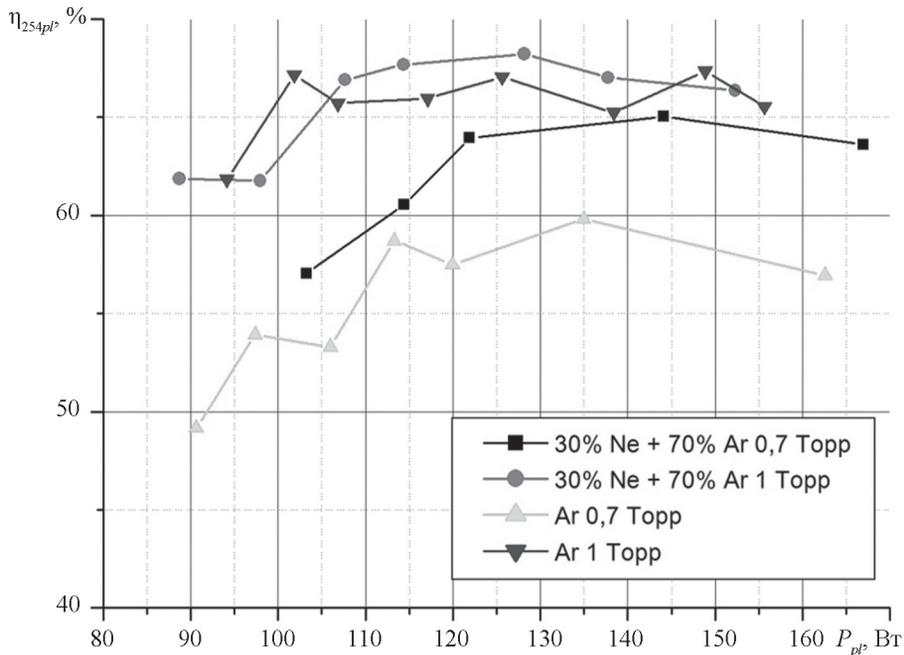


Рис. 14. Зависимость КПД генерации УФ-излучения плазмы η_{254pl} от мощности плазмы P_{pl}

метр трубки, низкие частоты ВЧ-поля и плотности плазмы).

Сдвиг максимума в зависимости η_{254pl} от P_1 в область меньших значений удельной мощности плазмы с увеличением диаметра разрядной трубки можно объяснить в контексте конкуренции двух противоположных процессов: возбуждения и деактивации («тушения») резонансно-возбужденных (6^3P_1) атомов ртути. Частота возбуждающих атомов ртути соударений увеличивается с ростом температуры электронов T_e , возрастающей с увеличением напряженности ВЧ электрического поля в плазме E_{pl} [15]. Резонансно-возбужденные атомы ртути деактивируются в результате неупругих соударений второго рода с электронами, частота которых возрастает с увеличением разрядного тока (плотности плазмы) [15]. С ростом диаметра разрядной трубки снижаются напряженность электрического поля в плазме \bar{E}_{pl} , электронная температура T_e и, следовательно, поток УФ резонансного излучения Φ_{254} и КПД генерации η_{254pl} [15].

При неизменной удельной мощности плазмы $P_1 = \bar{E}_{pl} I_{pl}$, уменьшение напряженности ВЧ электрического поля в плазме сопровождается пропорциональным возрастанием разрядного тока I_{pl} и, следовательно, плотности плазмы n_e . Рост n_e вызывает увеличение числа ударов второго рода электронов с резонансно-возбужденными атомами ртути («тушащие» соударения) и уменьшает поток УФ-излучения Φ_{254} и КПД генерации УФ-излучения плазмы η_{254pl} . Таким образом, чем больше диаметр разрядной трубки, тем при меньших удельных мощностях плазмы $P_1 = \bar{E}_{pl} I_{pl}$ зависимость η_{254pl} от мощности плазмы достигает своего максимума [17].

Высокими разрядными токами $I_{pl} = 2,6...2,8$ А, и относительно низкими напряженностями ВЧ электрического поля в плазме $E_{pl} = 0,75...0,80$ В/см можно объяснить более низкие значения КПД генерации УФ-излучения плазмы $\eta_{254pl} = 40\%$ в лампах трансформаторного типа, работавших на удельных мощностях $P_1 = 2,1...2,2$ Вт/см [7].

Из рисунков 12 — 14 следует, что в лампах с разрядной трубкой малого диаметра $d_{inn} = 16,6$ мм увеличение давления буферного газа от 0,7 до 1,0 мм рт. ст. ведет к заметному росту потока УФ-излучения Φ_{254} и КПД генерации УФ-излучения плазмы и лампы η_{254pl} и η_{254} . Аналогичные зависимости светового потока Φ_V и отдачи лампы η_V от давления буферного газа $p_{н.г}$ наблюдались в компактных индукционных ртутных люминесцентных лампах с диаметром плазмы коаксиального разряда $d_{pl} = 17$ мм [18]. В [17] экспериментально доказано, что максимум в зависимостях Φ_V и η_V от давления $p_{н.г}$ с уменьшением диаметра разрядной трубки (характерного размера плазмы) сдвигается в сторону больших значений $p_{н.г}$.

Данные на рис. 13, 14 доказывают, что повышение давления буферного газа от 0,7 до 1,0 мм рт. ст. сдвигает максимум в зависимостях η_{254pl} и η_{254} от P_{pl} в сторону меньших мощностей плазмы/лампы. Действительно, увеличение давления газа понижает напряженность электрического поля в плазме E_{pl} и повышает разрядный ток лампы. В результате тушащие соударения начинают проявлять себя на меньших удельных мощностях плазмы $P_1 = \bar{E}_{pl} I_{pl}$, а максимум в зависимостях η_{254pl} и η_{254} от P_1 сдвигается в область меньших значений P_1 .

С учетом потерь мощности в источнике питания и генераторе ВЧ-мощности на частоте $f = 1,7$ МГц ($\eta_{gen} \approx 0,9$) КПД генерации УФ-излучения комплекта η_k снижается на 10% и составляет $\sim 60\%$. Тем не менее, он значительно выше (на 20...25%), чем КПД электродных УФ-ламп, и на 10...15% превышает КПД УФ-ламп трансформаторного типа.

Заключение

Экспериментально установлено, что в бесферритной индукционной ртутной лампе низкого давления с замкнутой разрядной трубкой диаметром $d_{inn} = 16,6$ мм и длиной $\Lambda_{pl} = 815$ мм, возбужденной на частоте $f = 1,7$ МГц с помощью катушки индуктивности, изготовленной из литцендрата с низким погонным сопротивлением $\rho_w = 1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом/см, увеличение поглощенной плазмой мощности P_{pl} от 92 до 160 Вт сопровождается уменьшением мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от 7...9 до 3...4 Вт и возрастанием КПД катушки η_{coil} от 92 до 98%.

С ростом удельной мощности плазмы P_1 от 1,1 до 1,9 Вт/см средняя по сечению трубки напряженность ВЧ электрического поля \bar{E}_{pl} в лампе с аргоном давлением 1,0 мм рт. ст. монотонно уменьшается от 2,4 до 1,5 В/см, а разрядный ток I_{pl} возрастает от 0,5 до 1,3 А.

Литература

1. Shaffer J.W., Godyak V.A. The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamp // J. Ill. Eng. Soc. 2013. V. 28 (1). Pp. 142—145.
2. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160...1000 kHz // Plasma Sources Sci. and Technol. 2002. V. 11. Pp. 218—227.
3. Гвоздев-Карелин С.В. Особенности и примеры применения безэлектродной люминесцентной лампы Endura фирмы Osram // Светотехника. 2006. № 3. С. 9—12.
4. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity Low-pressure Electrodeless Mercury-argon Lamp for UV Disinfection of Wastewater // Journal Water and Environment Technol. 2005. V. 3. No. 1. Pp. 71—76.
5. Isupov M.V., Krotov S.V., Litvintzev A.Y., Ulanov I.M. An Induction UV Lamp // Light and Eng. 2008. V. 16. No. 1. Pp. 67—71.
6. Levchenko V.A., Popov O.A., Svitnev S.A., Starshinov P.V. Experimental Research into the Electrical and Optical Characteristics of Electrodeless UV Lamps of the Transformer Type // Light and Eng. 2015. V. 23. No. 1. Pp. 60—64.
7. Levchenko V.A., Popov O.A., Svitnev C.A., Starshinov P.V. Electrical and Radiation Characteristics of a Transformer Type Lamp with a Discharge Tube of 16.6 mm Diameter // Light and Eng. 2016. V. 24. No. 2. Pp. 77—81.
8. Свитнев С.А. и др. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Ч. 2.

Понижение давления буферного газа (аргона и смеси Ne/Ar) до 0,7 мм рт. ст. повышает напряженность ВЧ электрического поля и снижает разрядный ток лампы. Добавка к аргону неона ведет к росту напряженности ВЧ электрического поля \bar{E}_{pl} и уменьшению разрядного тока I_{pl} .

КПД генерации УФ-излучения плазмы исследованных ламп с замкнутыми трубками диаметром $d_{inn} = 16,6$ мм достигает при $P_1 = 1,3...1,8$ Вт/см высоких значений $\eta_{254pl} = 68\%$, а КПД генерации УФ-излучения лампы — $\eta_{254} = 66\%$. Они значительно выше КПД электродных УФ-ламп и ламп трансформаторного типа с разрядными трубками такого же диаметра, работающих на близких удельных мощностях плазмы, но имеющих более низкие напряженности электрического поля в плазме и более высокие разрядные токи [7, 9].

Увеличение давления буферного газа и диаметра разрядной трубки сдвигает максимум в зависимостях η_{254pl} от P_1 и η_{254} от P_{lamp} в сторону меньших удельных мощностей плазмы и, соответственно, меньших мощностей лампы.

Для снижения блокировки УФ-излучения лампы витками катушки индуктивности следует сократить число витков до одного-двух, повысив частоту генератора ВЧ мощности (ВЧ-поля) до 3...5 МГц [16, 19].

References

1. Shaffer J.W., Godyak V.A. The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamp. J. Ill. Eng. Soc. 2013;28 (1):142—145.
2. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160...1000 kHz. Plasma Sources Sci. and Technol. 2002;11:218—227.
3. Gvozdev-Karelin S.V. Osobennosti i Primery Primeneniya Bezelektrodnoy Lyuminescentnoy Lampy Endura Firmy Osram. Svetotekhnika. 2006;3:9—12. (in Russian).
4. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity Low-pressure Electrodeless Mercury-argon Lamp for UV Disinfection of Wastewater. Journal Water and Environment Technol. 2005;3;1:71—76.
5. Isupov M.V., Krotov S.V., Litvintzev A.Y., Ulanov I.M. An Induction UV Lamp. Light and Eng. 2008; 16;1:67—71.
6. Levchenko V.A., Popov O.A., Svitnev S.A., Starshinov P.V. Experimental Research into the Electrical and Optical Characteristics of Electrodeless UV Lamps of the Transformer Type. Light and Eng. 2015;23;1:60—64.
7. Levchenko V.A., Popov O.A., Svitnev C.A., Starshinov P.V. Electrical and Radiation Characteristics of a Transformer Type Lamp with a Discharge Tube of 16.6 mm Diameter. Light and Eng. 2016;24;2:77—81.
8. Svitnev S.A. i dr. Kharakteristiki Besferritnogo Induktsionnogo Razryada Nizkogo Davleniya. Ch. 2. Izlu-

Излучательные характеристики плазмы // УПФ. 2016. № 4. С. 372—384.

9. **Ультрафиолетовые** технологии в современном мире / под ред. Кармазинова Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцева Н.Н., Храменкова С.В. Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2012.

10. **Попов О.А., Старшинов П.В., Васина В.Н.** Исследование характеристик индукционного бесферритного ртутного разряда низкого давления в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 89—96.

11. **Старшинов П.В., Попов О.А., Ирхин И.В., Васина В.Н., Левченко В.А.** Электрические и излучательные характеристики индуктивных бесферритных ртутных УФ-ламп в замкнутых трубках // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 87—97.

12. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.

13. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. No. 1. Pp. 179—185.

14. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 1997. No. 4. Pp. 540—550.

15. **Рохлин Г.Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.

16. **Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В.** Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Ч. 1. Электрические параметры индуктивной катушки // УПФ. 2016. № 2. С. 139—149.

17. **Попов О.А.** Исследование влияния давления инертного газа на характеристики индукционных люминесцентных ламп // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 76—84.

18. **Popov O.A., Chandler R.T., Maya J.** Compact Inductively-coupled fluorescent Lamp Operated at Frequencies of 100...200 kHz // Light & Eng. 2007. V. 15. No. 1. Pp. 68—72.

19. **Lovlya E.V., Popov O.A.** Power Losses in RF Inductor of Ferrite-free Closed-loop Inductively-coupled Low Mercury Pressure Lamps // Light and Eng. 2020. V. 28. No. 2. Pp. 89—94.

Сведения об авторах:

Попов Олег Алексеевич — доктор технических наук, профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: popovoleg445@yahoo.com

Старшинов Павел Валерьевич — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: blitzzz-z@ya.ru

Иликеева Римма Анваровна — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

Буреева Дарья Александровна — технический специалист BELL Group

Ирхин Игорь Вячеславович — кандидат технических наук, ведущий инженер Всероссийского электротехнического института — филиала Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института технической физики им. академика Е.И. Забабахина

Левченко Владимир Александрович — кандидат физико-математических наук, заместитель заведующего лабораторией ООО «ЛИТ», г. Москва

chatel'nye Kharakteristiki Plazmy. UPF. 2016;4:372—384. (in Russian).

9. **Ul'trafiioletovye** Tekhnologii v Sovremennom Mire. Pod Red. Karmazinova F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtseva N.N., Khramenkova S.V. Dolgoprudnyy: Izdat. Dom «Intellect», 2012. (in Russian).

10. **Popov O.A., Starshinov P.V., Vasina V.N.** Issledovanie Kharakteristik Ninduktsionnogo Besferritnogo Rtutnogo Razryada Nizkogo Davleniya v Zamknutoy Trubke. Vestnik MEI. 2018;4:89—96. (in Russian).

11. **Starshinov P.V., Popov O.A., Irkhin I.V., Vasina V.N., Levchenko V.A.** Elektricheskije i Izluchatel'nye Kharakteristiki Induktivnykh Besferritnykh Rtutnykh UF-lamp v Zamknutykh Trubkakh. Vestnik MEI. 2019;3:87—97. (in Russian).

12. **Rayzer Yu.P.** Fizika Gazovogo Razryada. M.: Nauka, 1987. (in Russian).

13. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge. Plasma Sources Sci. Technol. 1992;1:179—185.

14. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge. Plasma Sources Sci. Technol. 1997;4:540—550.

15. **Rokhlin G.N.** Razryadnye Istochniki Sveta. M.: Energoatomizdat, 1991.

16. **Svitnev S.A., Popov O.A., Levchenko V.A., Starshinov P.V.** Kharakteristiki Besferritnogo Induktsionnogo Razryada Nizkogo Davleniya. Ch. 1. Elektricheskije Parametry Induktivnoy Katushki. UPF. 2016;2:139—149. (in Russian).

17. **Popov O.A.** Issledovanie Vliyaniya Davleniya Inertnogo Gaza na Kharakteristiki Induktsionnykh Lyuminestsentnykh Lamp. Vestnik MEI. 2013;3:76—84. (in Russian).

18. **Popov O.A., Chandler R.T., Maya J.** Compact Inductively-coupled fluorescent Lamp Operated at Frequencies of 100...200 kHz. Light & Eng. 2007;15:1:68—72.

19. **Lovlya E.V., Popov O.A.** Power Losses in RF Inductor of Ferrite-free Closed-loop Inductively-coupled Low Mercury Pressure Lamps. Light and Eng. 2020;28:2:89—94.

Information about authors:

Popov Oleg A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: popovoleg445@yahoo.com

Starshinov Pavel V. — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: blitzzz-z@ya.ru

Пикеева Римма А. — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI

Bureeva Darya A. — Technical Specialist of BELL Group

Irkhin Igor V. — Ph.D. (Techn.), Leading Engineer of All-Russian Electrotechnical Institute — Branch of the Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics Academician E.I. Zababakhin

Levchenko Vladimir A. — Ph.D. (Phys.-Math.), Deputy Head of the Laboratory of Open Company «ЛИТ», Moscow

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 13.12.2019

The article received to the editor: 13.12.2019